

Определение механических свойств многослойных материалов методом атомно-силовой спектроскопии

Маханек А.А.¹, Мельниковва Г.Б.¹, Петровская А.С.¹, Чижик С.А.¹

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»
e-mail: galachkax@gmail.com

DOI: 10.37795/RCEM.2020.30.75.037

Несмотря на достижения в области применения сканирующей зондовой микроскопии, остается много нерешенных проблем, т. к. при использовании данного метода исследователи сталкиваются с вопросами сравнительной характеристики получаемых данных локальных механических свойств материалов, оценки их распределения не только по исследуемой поверхности, но и по глубине объекта. Актуальным является количественное описание механических свойств двухслойных материалов нанометровой толщины на основании данных статической силовой спектроскопии.

Используемые модели, основанные на модели Герца, не учитывают силы адгезии наконечника зонда и исследуемого материала и не могут быть непосредственно применены в случаях значительного влияния адгезионных сил на величину относительно малых деформаций исследуемого материала. Получение достаточно малых деформаций в ходе исследования механических свойств тонких полимерных пленок обусловлено необходимостью предотвращения их деструкции в ходе исследования из-за продавливания или смещения (проскальзывания) пленки по подложке. В случае многослойного материала, также как и для однородного материала, возможно совместное использование модели Герца наряду с учетом сил адгезии при выборе точки контакта согласно модели Джонсона-Кенделла-Робертса и внесении соответствующей поправки в величину измеряемой силы (величина измеряемой силы корректируется на величину $(8F_a)/9$), F_a – сила отрыва зонда от образца.

Одной из моделей, применимой для определения механических свойств мягких пленок на жесткой подложке является модель Hsueh-Miranda [1], которая описывает взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с плоским двухслойным образцом: тонкой пленкой нанометровой толщины на поверхности подложки, толщиной в сотни раз выше, чем покрытие. Данная модель позволяет определить модуль упругости пленки E_c и подложки E_s , а также толщину пленки H из анализа данных статической силовой спектроскопии.

Согласно рассматриваемой модели модуль упругости пленки связан с эффективным модулем упругости выражением $E_c = \alpha^{-1} E_{eff}$, а эффективный модуль упругости E_{eff} вычисляется согласно модели Герца.

Влияние поправки α^{-1} на E_{eff} показано на рисунке 1, а пример определения толщины пленок при разной величине нагрузки – на рисунке 2.

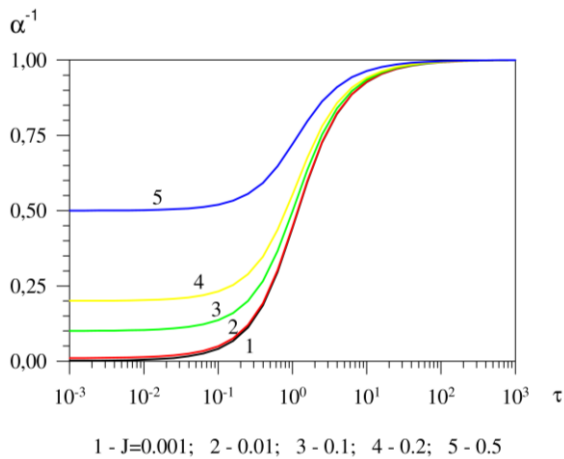


Рис.1. Зависимость поправки в E_{eff} от отношения толщины пленки к радиусу пятна контакта и параметра $J = E_c / E_s$

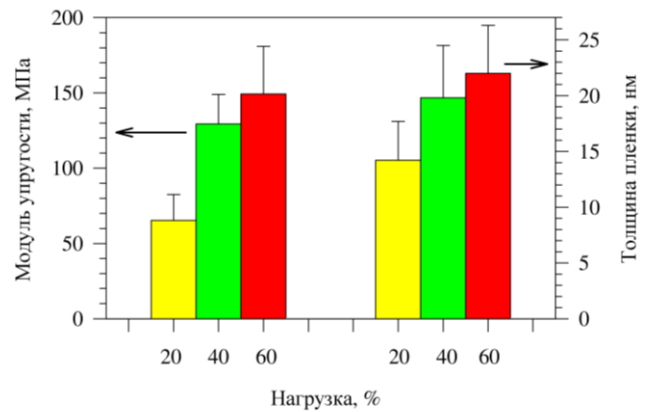


Рис.2. Влияние нагрузки на результат измерения модуля упругости и толщины пленки на кремниевой подложке

Алгоритм совместного определения модулей упругости пленки и подложки, а также толщины пленки основан на минимизации следующей целевой функции:

$$\Phi(E_c, E_s, H) = \sum_n (E_{c,n} - E_c)^2 = \min$$

Данная задача решалась методом Хука-Дживса. Локальное значение модуля упругости является известной функцией от известных $(F_n, \delta_n, R, \nu_c, \nu_s)$ и искоемых (E_c, E_s, H) параметров: $E_{c,n} = f(F_n, \delta_n, R, \nu_c, \nu_s, E_c, E_s, H)$. Если подложка жесткая и ее деформацией можно пренебречь, тогда $J \approx 0$ и параметр E_s исключается из оптимизационной задачи.

С использованием данного подхода для тонких пленок поливинилкарбазола на кремнии, сформированных методом спин-коатинга, на основании данных статической силовой спектроскопии (НТ-206, ОДО «Микротестмашины», РБ) был рассчитан модуль упругости и толщина пленки, которые составили 135 МПа и 20 нм, соответственно. Показано (рисунок 2), что при нагрузке кантилевера 20 % от максимальной наблюдается существенное занижение измеряемых значений модуля упругости и толщины пленки. Нагрузки 40 и 60 % дают достоверно не различимые результаты и являются оптимальными при использованном в эксперименте кантилевере с жесткостью 3 Н/м и радиусе кривизны острия 20 нм.

Данное исследование было выполнено в рамках задания 3.03 ГПНИ «Конвергенция-2020», подпрограмма «Объединение».

Список литературы:

- [1] Ch.-H. Hsueh, P.Miranda J. Mater. Res. **19**, 94–100 (2004)